



**Développement d'un code éléments finis pour simuler le soudage par ultrasons de matériaux composites =  
Development of a Finite element code for simulating the ultrasonic welding of composite materials**

Arthur Lévy, Steven Le Corre, Armand Poitou, Nicolas Chevaugnon

► **To cite this version:**

Arthur Lévy, Steven Le Corre, Armand Poitou, Nicolas Chevaugnon. Développement d'un code éléments finis pour simuler le soudage par ultrasons de matériaux composites = Development of a Finite element code for simulating the ultrasonic welding of composite materials. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00387409

**HAL Id: hal-00387409**

**<https://hal.science/hal-00387409>**

Submitted on 11 Jun 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développement d'un code éléments finis pour simuler le soudage par ultrasons de matériaux composites.

## *Development of a Finite element code for simulating the ultrasonic welding of composite materials.*

Arthur LEVY<sup>1</sup>, Steven LE CORRE<sup>1</sup>, Arnaud POITOU<sup>1</sup>, Nicolas CHEVAUGEON<sup>1</sup>.

1 : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique(GeM)

Ecole Centrale Nantes, Université de Nantes - 1 rue de la Noé 44321 Nantes, France.

e-mail : [arthur.levy ; steven.le-corre ; arnaud.poitou ; nicolas.chevaugueon]@ec-nantes.fr

### Résumé

Le développement récent des matériaux composites à matrices thermoplastiques c'est accompagné de nouveaux moyens d'assemblages. Nous nous concentrons ici sur le soudage par ultrasons. Afin d'étudier l'influence des paramètres procédé sur la qualité d'une soudure, nous proposons une modélisation puis une simulation du procédé. La modélisation se fait à l'aide de deux problèmes mécaniques et d'un problème thermique. Un code de simulation multiphysique a été développé afin de résoudre ces trois problèmes. L'évolution que subit l'interface est simulé à l'aide d'une méthode de level-set et de contact unilatéral par pénalité. Les simulations en 2D sans modélisation du contact montrent que des porosités sont piégées à l'interface. Ceci est confirmé par les essais de soudage statique (sans mouvement de l'outil). Les simulations avec modélisation du contact permettent de mieux décrire l'écrasement à l'interface mais montrent des lacunes physiques. Le soudage dynamique avec avance de l'outil est un variant du procédé permettant de limiter les porosités à l'interface. La simulation de l'écoulement tridimensionnel qui en résulte est en cours. Elle devrait permettre d'expliquer la meilleure qualité de la soudure.

### Résumé

The recent development of thermoplastic matrix composite material was followed by new assembling process. The present work focuses on ultrasonic welding. In order to study the influence of the process parameter on the quality of the welding, we propose a modeling and a simulation of the process. The modeling consists in two mechanical problems and one thermal problem. A multiphysic simulation code was developed for solving these three problems. The evolution of the interface is simulated using a level-set method and an unilateral contact handled with penalty. The 2D simulations without contact show that voids are trapped at the interface. This is confirmed with static tests (with no movement of the tool). The simulations with modeling of the contact allow to better describe the squeezing at the interface but show physical limits. Dynamic welding, where the tool is advancing, is an extension of the process that limits voids at the interface. The simulation of the induced 3D flow is under investigation. It should allow to explain the better quality of the welding.

**Mots Clefs :** Polymères, Rhéologie, Simulation multiphysique, Level-set.

**Keywords :** Polymers, Rheology, Multiphysical Simulation, Level-set

## Introduction

Le récent développement de matériaux composites à matrices thermoplastiques ouvre de nouvelles perspectives, en particulier dans l'industrie aéronautique. Outre de nombreux moyen de mise en forme impossible sur des composites à matrice thermodurcissable, de nouvelles technique d'assemblage ont vu le jour. L'assemblage par soudage est possible par fusion la matrice. Le soudage de matériaux composites reste difficile du fait de la conductivité thermique très basse des polymères. Afin d'assurer la fusion de la matrice thermoplastique à l'interface de contact seulement, il faut chauffer l'assemblage très localement. Quelques voies telles que le soudage par résistance ou par induction existent. Nous nous intéressons ici à un procédé connu depuis quelques décades : le soudage par ultrasons.

L'objectif est de développer un outil numérique de simulation de l'écoulement de polymère à l'interface de soudage. Cet outil sera utile pour mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu ainsi que l'influence des différents paramètres du procédé sur la morphologie de l'écoulement et donc la qualité finale de la soudure.

Dans une première partie, nous détaillons brièvement la technologie du soudage par ultrason afin d'introduire les phénomènes physiques intervenant dans le procédé. Dans la deuxième partie, nous posons le problème thermo-mécanique complet. Nous présentons en troisième partie le code de calcul multiphysique développé afin de simuler le procédé, puis dans une dernière partie, quelques résultats obtenus.

# 1 Présentation du procédé et état de l'art

## 1.1 Présentation du procédé

Des picots appelés directeurs d'énergie sont moulés sur une des plaques à souder. L'assemblage est ensuite disposé sous un outillage, la sonotrode, qui applique une compression sinusoïdale à 20 KHz. La déformation se concentre dans les directeurs d'énergie qui s'auto-échauffent fondent et assurent le soudage (cf. Fig. 1). Alors que le soudage par ultrasons

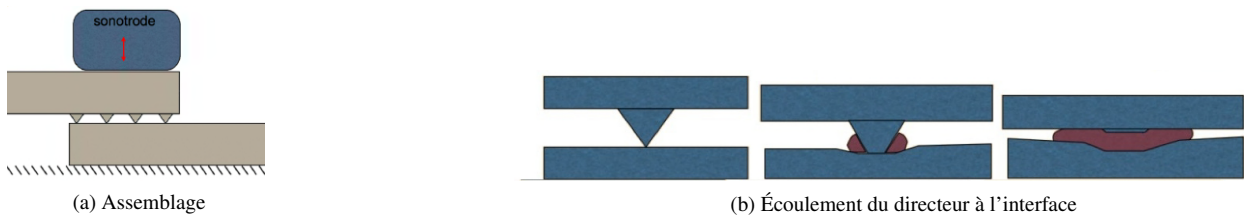


FIG. 1: Soudage par ultrasons de deux plaques

est relativement connue dans l'industrie plastique, l'innovation proposée par EADS consiste à faire avancer la sonotrode le long des picots, on obtient alors un "joint soudé". C'est ce que l'on appelle le soudage dynamique.

Ce procédé permet d'obtenir de bien meilleurs résultats, en particulier très peu de porosités à l'interface comme le montre la figure 2. Deux points importants sont envisagés pour expliquer ces résultats :

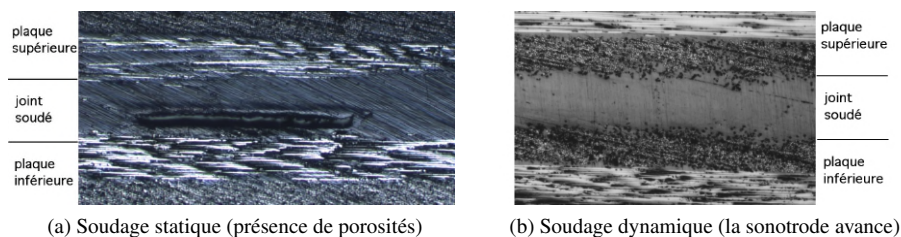


FIG. 2: Coupe microscopique d'un joint soudé.

1. l'influence de la géométrie initiale du directeur, qui détermine grandement l'auto-échauffement, et donc l'initiation du soudage.
2. l'effet 3D dû à l'avance de la sonotrode, qui induit un écoulement tridimensionnel à l'interface. Cet écoulement pourrait expliquer, par exemple, le très bon mouillage des plaques.

## 1.2 Innovation proposée

Quelques auteurs ont déjà proposé une modélisation du procédé dit "statique" (où la sonotrode n'avance pas). Nous pouvons citer Benatar [3] qui a proposé une étude successive des différents phénomènes physiques entrant en jeu dans le procédé. Bien qu'il n'ait pas proposé de simulation numérique, nous retiendrons en particulier son analyse du terme d'auto-échauffement. Tout comme Tolunay [12], il considère la déformation induite par la vibration de la sonotrode comme petite, et donc adopte le cadre de la viscoélasticité linéaire. La fréquence de vibration étant très élevée, la déformation due à la vibration de la sonotrode est obtenue en résolvant un problème d'élasticité linéaire. La dissipation d'énergie mécanique (l'auto-échauffement) est alors déterminée à l'aide de la théorie de la viscoélasticité linéaire.

D'autres auteurs ont suivi et ont étudié à l'aide de simulations numériques (Wang [13]), ou de campagnes d'essais (Suresh [11]), l'influence de la géométrie initiale sur ce terme d'auto-échauffement et donc sur le champ de température à l'interface.

Néanmoins, nul n'a proposé de simulation numérique de la phase suivante du soudage, à savoir l'écoulement du picot à l'interface. C'est pourquoi nous proposons un outil numérique permettant de simuler l'écoulement d'un picot en tenant compte de l'auto-échauffement et donc nécessairement, de la vibration.

## 2 Position du problème thermo-mécanique

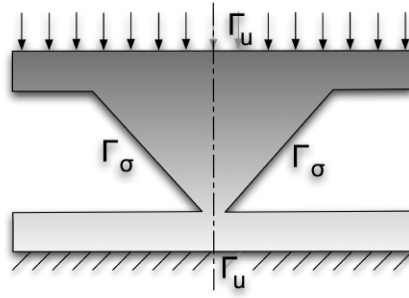


FIG. 3: Géométrie du directeur d'énergie.

Considérons un unique directeur d'énergie, tel que celui décrit dans la Figure 3. Nous allons modéliser l'écoulement de ce directeur à l'interface. Pour ce faire, en nous basant sur des travaux antérieurs [7] nous proposons une décomposition du problème thermo-mécanique global en trois sous problèmes couplés :

- Un problème d'élasticité pour caractériser l'effet de la vibration de la sonotrode.
- Un problème thermique avec terme source provenant de la solution du problème d'élasticité.
- Un problème de mécanique des fluides pour déterminer l'écoulement du directeur d'énergie à l'interface.

Ces trois sous problèmes sont représentés figure 4.

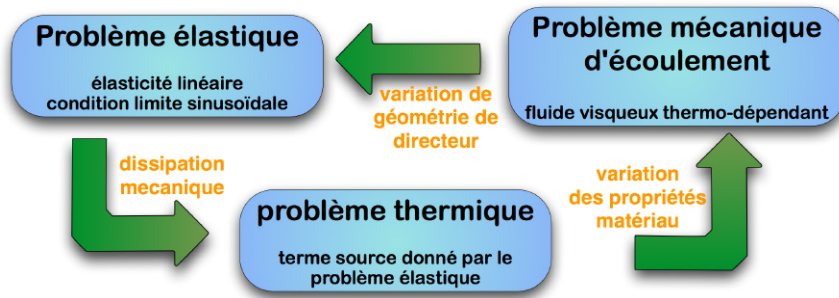


FIG. 4: Les trois problèmes couplés

### 2.1 Problème d'élasticité

La fréquence de vibration de la sonotrode est très élevée (20 KHz) par rapport aux temps de relaxation caractéristique du polymère. On considère donc que cette vibration entraîne uniquement des déformations élastiques. Le lecteur pourra se référer à l'analyse par homogénéisation temporelle [7] qui permet de confirmer cette hypothèse. D'autre part nous supposons que l'amplitude des vibrations est suffisamment petite pour que le comportement élastique soit linéaire. Notons que ces deux hypothèses sont largement utilisées dans la littérature.

Le problème à résoudre s'écrit alors :

$$\begin{cases} \sigma = \lambda \text{Tr}(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon & \text{on } \Omega \\ \nabla \cdot (\sigma) = \underline{0} & \text{on } \Omega \end{cases} \quad \begin{cases} u = a \sin(\omega t) & (\Gamma_{sup}) \\ u = 0 & (\Gamma_0) \\ \sigma \cdot n = 0 & (\Gamma_{lat}) \end{cases}$$

où  $\sigma$  est le tenseur des contraintes,  $\varepsilon$  le tenseur des déformations,  $u$  le déplacement,  $\lambda$  et  $\mu$  les deux coefficients de Lamé, tirés de  $E$  le module d'Young et  $\nu$  le coefficient de poisson.  $a$  est l'amplitude des vibrations imposées par la sonotrode et  $\omega$  sa pulsation.

### 2.2 Problème thermique

Le champ de température est déterminé en résolvant un problème thermique de diffusion-convection avec terme source, celui-ci étant issu du problèmes d'élasticité. En considérant que le domaine est isolé thermiquement, le système à résoudre s'écrit :

$$\begin{cases} \rho c \left( \dot{\theta} + \underline{\text{grad}}(\theta) \cdot \underline{v} \right) = k \Delta \theta + Q \\ k \cdot \nabla \theta \cdot n = 0 \text{ on } (\Gamma_{lat} \cup \Gamma_0 \cup \Gamma_{sup}) \end{cases} \quad (1)$$

où  $\theta$  est la température,  $k$  la conductivité thermique et  $\rho c$  la capacité calorifique.

Le terme source de dissipation mécanique  $Q$  est déterminé dans la littérature [12, 11] à l'aide de la théorie de la viscoélasticité linéaire :

$$Q = \frac{\omega E''}{2} \varepsilon : \varepsilon. \quad (2)$$

Cette expression est une restriction du terme source obtenu dans notre travail précédent. Elle peut être retrouvée en considérant d'une part, que l'auto-échauffement induit par l'écoulement du picot est négligeable devant celui induit par la vibration, et d'autre part, que cet écoulement est lent par rapport au temps de relaxation du polymère. Notons bien que la résolution du problème d'élasticité permet simplement de déterminer le champ de déformation dû à la vibration de la sonotrode. C'est bien sûr la partie visqueuse du comportement visco-élastique du polymère qui permet d'expliquer l'auto-échauffement par la formule (2).

### 2.3 Problème d'écoulement

Nous avons restreint notre simulation à un comportement de fluide visqueux incompressible. Néanmoins, afin de décrire l'évolution de la géométrie à l'interface de manière plus réaliste, un comportement de fluide quasi-newtonien a été adopté. Le système d'équations à résoudre devient alors :

$$\begin{cases} \sigma = 2 \cdot \eta \cdot D & (\Omega) \\ \nabla \cdot (\sigma - pI) = 0 & (\Omega) \\ \nabla \cdot v = 0 & (\Omega) \end{cases} \quad \begin{cases} v = v_d(t) & (\Gamma_{sup}) \\ v = 0 & (\Gamma_0) \\ (\sigma - pI) \cdot n = 0 & (\Gamma_{lat}) \end{cases}$$

où  $\sigma$  est le tenseur des extra contraintes,  $p$  la pression,  $D$  le tenseur des taux de déformation et  $v$  la vitesse. Alors que la vibration a déjà été traitée dans le problème élastique, la sonotrode impose sur la surface  $\Gamma_{sup}$  un écrasement  $v_d$ . La viscosité apparente  $\eta$  suit une loi de Carreau rhéofluidifiante et une loi d'Arrhenius pour la thermo-dépendance :

$$\eta = \eta_0(\theta) \left( 1 + (\tau_c D_{eq})^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} \quad \eta_0(\theta) = A \exp \left( \frac{E_a}{R(\theta + 273)} \right) \quad (3)$$

où  $D_{eq}$  est la taux de déformation équivalent,  $\tau_c$  le temps de relaxation de carreau,  $m$ ,  $E_a$  et  $A$  sont des paramètres matériaux.

### 2.4 Couplages

Trois types de couplages interviennent dans notre modélisation

- Un premier couplage fort entre thermique et élasticité. Un terme de dissipation d'énergie mécanique, directement calculé à partir du problème d'élasticité, intervient comme terme source dans le problème thermique.
- Un second couplage faible entre les champs de température et les deux autres problèmes. Les paramètres mécaniques sont effectivement thermo-dépendant.
- Un dernier couplage géométrique entre le problème d'écoulement et les deux autres. Le champ de vitesse détermine effectivement l'évolution de la géométrie. Il faut mettre à jour la géométrie à chaque instant avant de résoudre les problèmes thermique et élastique.

## 3 Simulation du procédé

Afin de résoudre ces trois systèmes d'équations, nous allons faire appel à une méthode numérique par éléments finis. L'objectif est de caractériser au mieux l'écoulement à l'interface. En effet la manière dont les picots vont se déformer pour former un film à l'interface va grandement influencer la qualité de la soudure (mouillage de la surface, présence de porosités...). La particularité du problème est donc la présence d'une surface libre, qui suite à de grandes déformations va déterminer l'évolution de la géométrie. Pour traiter ce problème, nous avons fait le choix d'utiliser une méthode de level-set que nous détaillerons par la suite. Afin d'utiliser certains outils déjà existants, nous avons développé notre code à l'aide de la librairie C++ XFEM.

Nous avons développé un code élément finis adapté au procédé étudié. Néanmoins, il est facilement réutilisable pour de nombreux types de problèmes multiphysiques étant donné sa structure orientée objet. L'implémentation d'une nouvelle formulation faible d'équation aux dérivées partielles se fait dans un cadre de résolution non-linéaire.

### 3.1 Schéma d'intégration numérique

**Interpolations utilisées.** Le problème est résolu en déplacement avec une interpolation d'ordre 1. Le champs de température est également interpolé à l'ordre 1. Par contre, le problème d'écoulement incompressible est résolu à l'aide d'une formulation mixte en vitesse pression avec une approximation P1+/P1 respectant les conditions LBB.

**Schéma de résolution itérative.** En ce qui concerne le couplage des trois problèmes physiques, à chaque pas de temps, une résolution itérative est adoptée. Basée sur un schéma de Gauss-Seidel, chaque problème non-linéaire est résolu successivement, et ce jusqu'à ce que l'ensemble des trois problèmes ait convergé (cf. figure (5)).

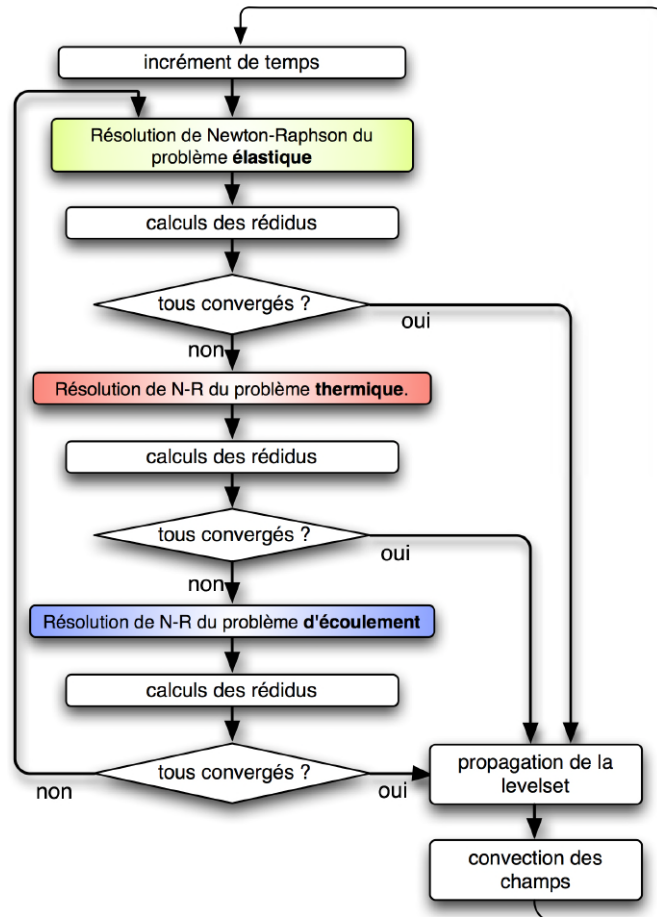


FIG. 5: Schéma de résolution itératif.

### 3.2 Gestion de la surface libre

**Description à l'aide d'une level-set** Étant donné les grandes déformations que subit le picot lors du soudage, la méthode eulérienne des level-set nous a semblée bien adaptée pour caractériser notre surface libre. Elle consiste à définir une interface à l'aide d'un champ scalaire positif à l'extérieur du matériau (dans l'air) et négatif à l'intérieur (le polymère). L'iso-zéro du champ coïncide alors avec la surface libre. Un cas particulier est celui où la level-set est la distance algébrique à l'interface. Pour des raisons pratiques (en particulier pour la gestion du contact), nous garderons cette définition toute au long de la simulation.

Les problèmes physiques sont ensuite résolus de manière classique sur l'ensemble du domaine. Seuls les paramètres matériaux diffèrent suivant le signe de la level-set au point considéré. Il reste néanmoins qu'à l'interface, les champs peuvent présenter des singularités (discontinuité de gradient, par exemple). Afin d'améliorer la description à l'interface, nous envisageons d'enrichir les éléments finis coupés par l'iso-zéro de la level-set à l'aide d'une méthode X-FEM.

**Évolution de la géométrie** A chaque pas de temps le déplacement de la surface libre se fait en résolvant l'équation de convection du champs level-set  $\phi$  :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot v = 0.$$



Cette étape est effectuée à l'aide d'une méthode de Hamilton Jacobi [9]. C'est cette étape qui détermine, avec une condition CFL, le pas de temps maximum applicable à l'ensemble de la résolution.

**Spécificité du problème thermique** Le schéma d'intégration consiste à résoudre les problèmes physiques sur un domaine fixe, puis à mettre à jour le domaine en déplaçant la surface libre. Le problème thermique de diffusion convection (1) doit donc être résolu de manière cohérente avec ce cadre. La méthode adoptée, basée sur les travaux de Smolianski [10], consiste à résoudre le problème en deux temps.

Le problème de diffusion seule est résolu dans un premier temps sur un domaine donné  $\Omega(t)$ . Le champ de température obtenu est ensuite convecté en résolvant un problème de convection seul. Le problème de convection seul ne dépend pas de la position de la level-set puisqu'il ne fait pas intervenir de valeur matériau. Cette étape de convection peut donc être effectuée indifféremment avant ou après le déplacement de la level-set. Le problème de convection de température est résolu à l'aide d'une méthode de Petrov Galerkin (SUPG).

### 3.3 Maillage

Bien que notre code soit développé en vue d'effectuer des calcul tridimensionnels, à l'heure actuelle, le solveur linéaire utilisée pour chaque itération de Newton Raphson est un solveur SuperLU non-itératif. Il en résulte que nous sommes limités à environ 100 000 degrés de libertés (soit environ 10 000 noeuds pour le problème en vitesse pression 3D). Le maillage utilisé est un maillage non structuré de triangles (ou de tétraèdre) raffiné au niveau du picot. Le nombre de noeud du maillage 3D est encore trop faible pour obtenir des résultats exploitables sur l'écoulement à l'interface.

### 3.4 Contact

Les premières simulations effectuées [6] décrivent mal l'évolution de la surface libre aux alentours de la pointe du picot. En effet, la description de l'interface air-matière à l'aide d'une unique level-set, visible sur la figure 6, présente des

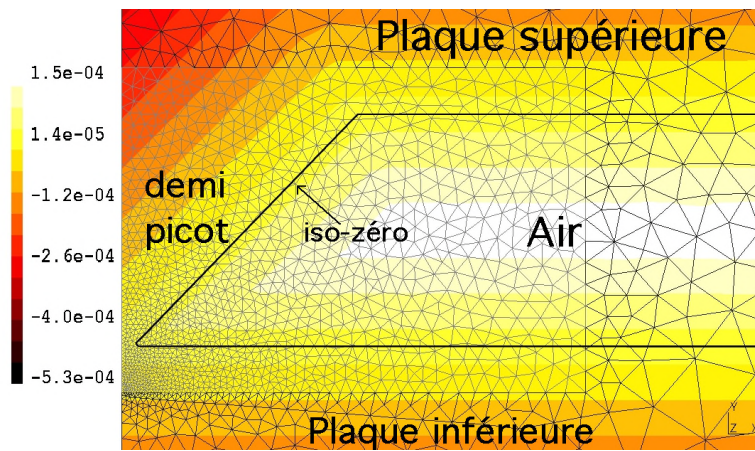


FIG. 6: Description initiale de la géométrie à l'aide d'une level-set

limites : d'une part numérique, car un coin ne peut être décrit à l'aide d'une unique level-set dans un élément, et d'autre part physiques, puisqu'il y a en réalité deux matériaux en contact. Nous avons donc implémenté dans notre code une gestion du contact par pénalité. Cela consiste simplement à appliquer sur l'iso-zéro de la level-set décrivant le matériau une force  $f$  telle que :

$$f = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta \geq 0 \\ \xi \delta^2 n & \text{si } \delta < 0 \end{cases}$$

où  $\delta$ , qui est la distance algébrique entre les deux interfaces, est négatif en cas de pénétration,  $n$  est la normale sortante et  $\xi$  le coefficient de pénalisation. Une pénalisation d'ordre deux permet de régulariser la convergence du problème non linéaire. Cette expression de la pénalisation est similaire à celle adoptée par Bellet et Heinrich [2] qui réinitialisent le coefficient de pénalisation à l'aide de la pénétration. Cette méthode a le mérite d'être très efficace dans le cadre d'une interface décrite par une level-set qui donne directement la distance  $\delta$ . Dans cette première version, en revanche, la partie inférieure est considérée comme indéformable.

## 4 Résultats

### 4.1 Paramètres matériaux utilisés

Les paramètres matériaux utilisés sont adaptés de la littérature [8, 1, 4]. Il sont donnés dans la table 1. Nous avons utilisé une interpolation linéaire grossière des mesures de Goyal [5] pour modéliser la dépendance du module d'Young à la température. Le module de perte nécessaire pour déterminer le terme source de l'équation (2) est obtenu en extrapolant les mesures de Nicodeau [8] à la pulsation de la sonotrode.

Élasticité	
Module d'Young	$E = \begin{cases} 2.2 \cdot 10^9 - 0.75 \cdot 10^7 \cdot (T[^\circ\text{C}]) \text{ Pa} & \text{si } T < 250^\circ\text{C} \\ 3 \cdot 10^8 \text{ Pa} & \text{si } T > 250^\circ\text{C} \end{cases}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.4$
Écoulement	
Coefficient pré-exponentiel de la viscosité newtonienne	$A = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}^m$
Énergie d'activation	$E_a = 7.44 \cdot 10^4$
Temps caractéristique de la loi de Carreau	$\lambda = 1 \text{ s}$
Indice puissance de la loi de Carreau	$m = 0.54$
Thermique	
Conductivité thermique	$0.24 \text{ W/m/K}$
Capacité calorifique	$\rho C = 1.3 \cdot 10^6 + 4500 \cdot T[^\circ\text{C}] \text{ J/m}^3/\text{K}$
Auto-échauffement et procédé	
Pulsation de la sonotrode	$\omega = 1.25 \cdot 10^5 \text{ rad/s}$
Module de perte viscoélastique	$E'' = 20 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

TAB. 1: Paramètres matériaux utilisés.

### 4.2 Effet de pointe du directeur d'énergie.

Les premières simulations bidimensionnelles montrent que la température la plus haute durant la phase initiale du procédé, se situe bien au voisinage de la pointe du picot (Figure 7(a)). Ce premier résultat, qui confirme ce que l'on peut trouver dans la littérature, montre l'importance primordiale du directeur d'énergie. En effet, c'est bien sa forme spécifique qui permet de concentrer l'énergie mécanique et d'obtenir une augmentation de température suffisante pour initier le procédé. La phase suivante du procédé, à savoir lorsque la pointe du directeur commence à s'écouler, est également primordiale pour la qualité du soudage. L'évolution de la level-set en pointe de picot, présentée figure 7 (b), montre un emprisonnement de bulles d'air, à l'origine de porosités à l'interface.

Néanmoins, comme expliqué précédemment, la description numérique de l'écrasement à l'aide d'une unique level-set pose problème. Afin de déterminer plus précisément la morphologie de l'écoulement, analysons les résultats de la simulation avec prise en compte du contact.

### 4.3 Prise en compte du contact.

Outre la meilleure description de l'écrasement, visible sur la figure 8, la modélisation du contact permet de conserver l'histoire de l'interface. Des considérations locales peuvent alors permettre de caractériser la cicatrisation de l'interface et donc la qualité du soudage.

Néanmoins, il faut bien noter que la modélisation du contact utilisée est encore imparfaite. Le problème dans la plaque inférieure n'est pas résolu, l'interface étant supposée rigide. Or la simulation précédente montre que les phénomènes thermo-mécaniques dans cette partie ont un rôle non négligeable. Finalement, si cette modélisation du contact permet d'améliorer la description de l'interface, c'est au détriment de la physique (cf. Figure 9).

### 4.4 Intérêt d'une simulation tridimensionnelle.

La première simulation à l'aide d'une unique level-set semble plus réaliste d'un point de vue physique, dès lors que le maillage est suffisamment raffiné au niveau de la pointe du picot. Ces résultats en deux dimensions montrent bien qu'il y a un emprisonnement de porosités dans le soudage dit statique. Dès lors, une étude du procédé dynamique (où la sonotrode



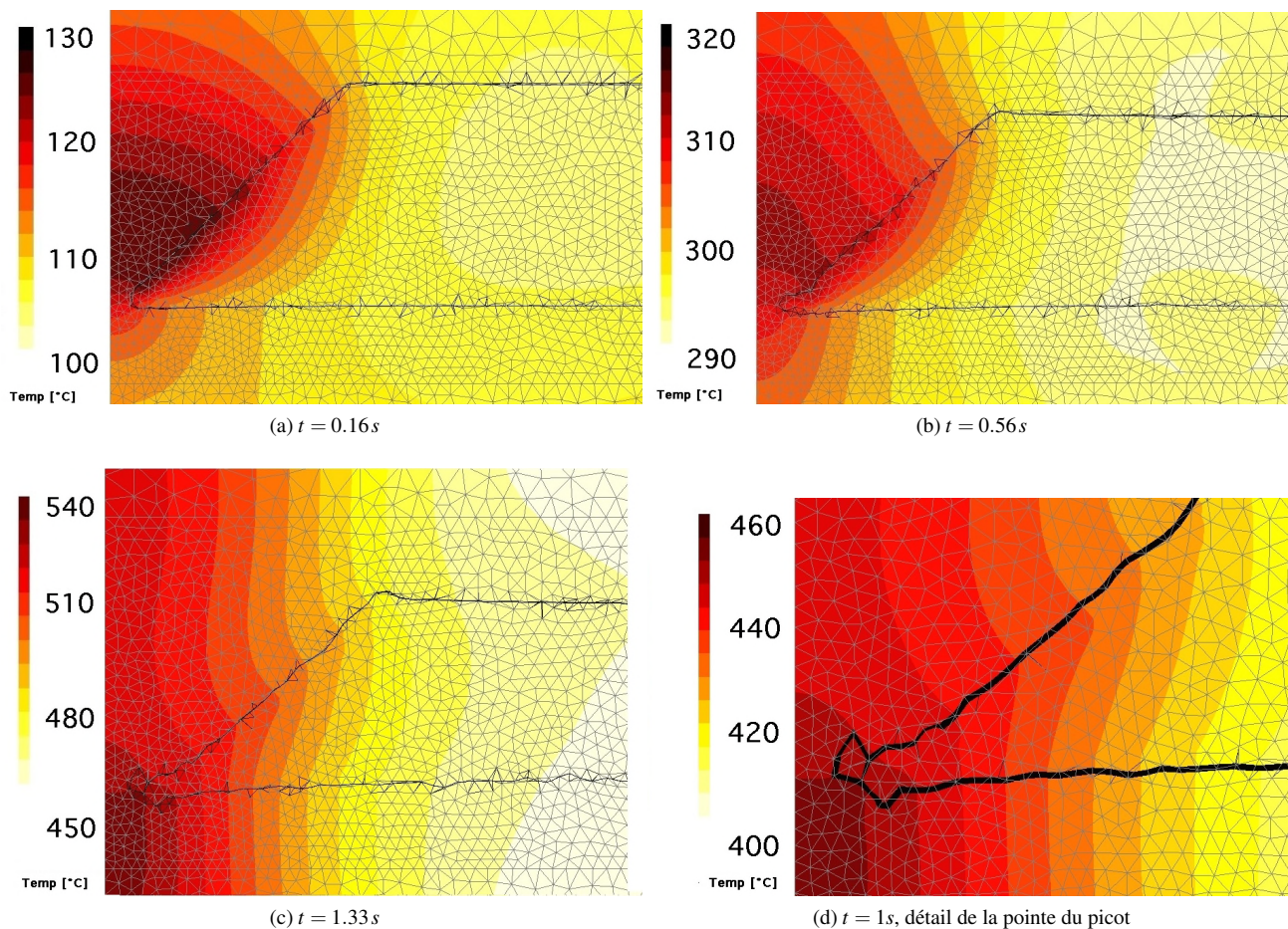


FIG. 7: Champs de températures simulés en 2D sans contact.

avance) est nécessaire afin de confirmer que la morphologie de l'écoulement 3D améliore le soudage. Les simulations tridimensionnelles sont en cours.

## 5 Conclusion

Afin d'étudier le procédé de soudage par ultrasons, nous avons développé un code éléments finis qui s'avère utilisable pour d'autres applications. Dans un cadre de résolution multiphysique la gestion de surfaces libres se fait à l'aide d'une méthode par level-set. Les premières simulations confirment bien l'expérience : le soudage dit « statique » donne de nombreuses porosités à l'interface. La modélisation d'un contact à l'aide de deux level-set permet alors de décrire l'écrasement de l'interface plus proprement. Ces résultats pourront être facilement améliorés en modélisant un contact frottant qui doit influencer sensiblement la morphologie de l'écoulement. Néanmoins, la modélisation adoptée pour l'instant ne modélise pas fidèlement la physique de la plaque inférieure et reste insatisfaisante..

Afin de remédier à la présence de porosités à l'interface, EADS propose le procédé de soudage dynamique. La simulation de l'écoulement tridimensionnel qui en résulte permettrait de mieux comprendre la physique à l'interface. Cette simulation, qui bénéficie des apports des études 2D, nécessite une optimisation du code pour des raisons évidentes de temps de calcul.

## Remerciements

Nous tenons à remercier EADS Innovation Work, l'équipe du techno-campus de Nantes et plus particulièrement Eric Soccard. C'est grâce à sa grande connaissance du procédé que cette étude a été possible.

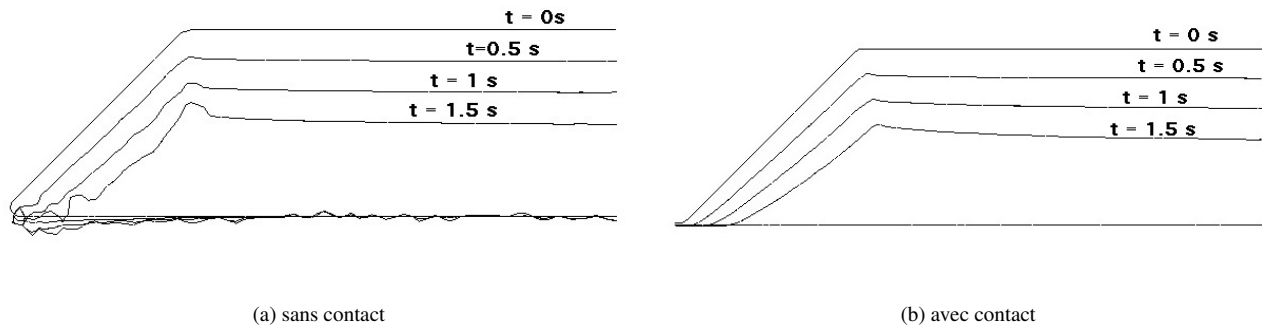


FIG. 8: Evolution de l'interface simulée en 2D

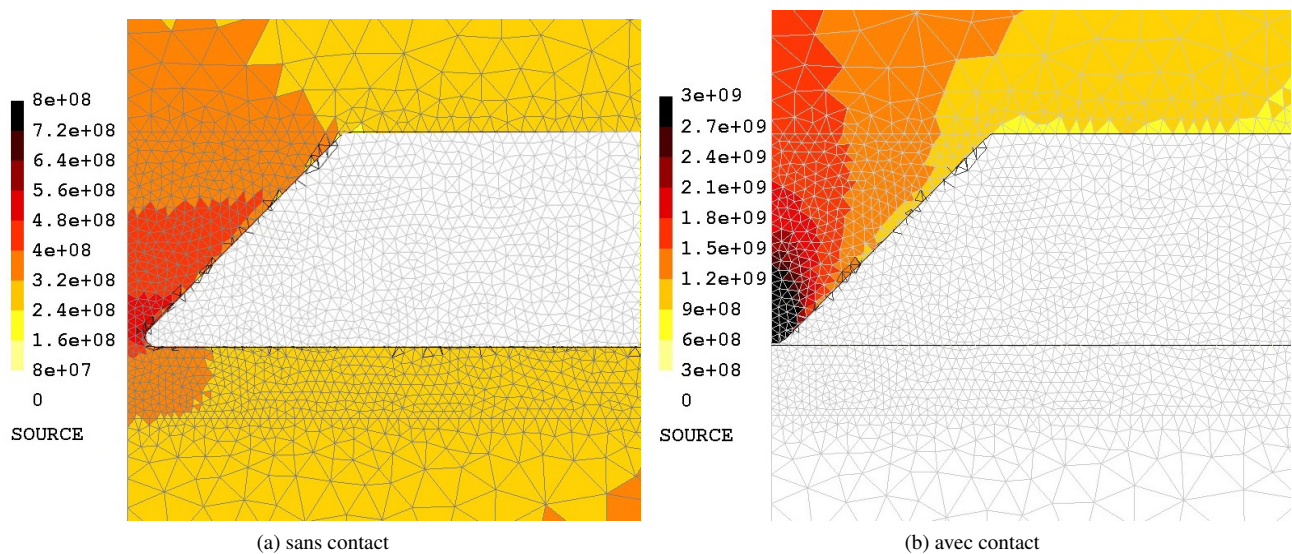


FIG. 9: Terme source simulé à l'instant initial

## Références

- [1] C. Ageorges, L. Ye, Y.-W. Mai, M. Hou. « Characteristics of resistance welding of lap shear coupons : Part i : Heat transfer » . *Composites*, Vol. 29A, pp.899–909, 1998.
- [2] M. Bellet, A. Heinrich. « A two-dimensional finite element thermomechanical approach to a global stress-strain analysis of steel continuous casting » . *ISIJ International*, Vol. 44(10), pp.1686–1695, 2004.
- [3] A. Benatar, T. G. Gutowski. « Ultrasonic welding of peek graphite apc-2 composites » . *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29(23), pp.1705, 1989.
- [4] F. Cogswell. « Thermoplastic aromatic polymer composites » . Woodhead, 1992.
- [5] R. K. Goyal, A. Tiwari, U. Mulik, Y.S.Negi. « Effect of aluminum nitride on thermomechanical properties of high performance peek » . *Composites Part A : applied Science and manufacturing*, Vol. 38(2), pp.516–524, 2007.
- [6] A. Levy, S. Le Corre, A. Poitou, E. Soccord. « Ultrasonic welding of thermoplastic composites, modeling of the process. » . *International Journal of Material Forming*, Vol. Online First™(1), 2008.
- [7] A. Levy, S. L. Corre, A. Poitou, E. Soccord. « Ultrasonic welding of thermoplastic composites, modeling of the process using time homogenization. » . *Internal Journal of Multiscale Computational Engineering*, Vol. In Press, 2009.
- [8] C. Nicodeau. « Modelisation du soudage en continu des composites a matrice thermoplastique » . thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers de Paris, 09 2005.
- [9] J. Sethian. « Level set methods and fast marching methods : Evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science » . Cambridge University Press, 1999.
- [10] A. Smolianski. « Finite-element / level-set / operator-splitting (felsos) approach for computing two-uid unsteady ows with free moving interfaces. » . *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 48, pp.231–269, 2005.

- [11] K. Suresh, M. Rani, K. Prakasan, R. Rudramoorthy. « Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs » . *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 186(1-3), pp.138–146, 2007.
- [12] M. Tolunay. « Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics » . *Polymer Engineering and Science*, Vol. 23(13), pp.726–733, 1983.
- [13] X. Wang, J. Yan, R. Li, S. Yang. « Fem investigation of the temperature field of energy director during ultrasonic welding of peek composites » . *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 19(5), pp.593, 2006.